

УДК 621.9.62:621.81–192

С.А. БУКАТЫЙ<sup>1</sup>, А.С. БУКАТЫЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>Рыбинская государственная авиационная технологическая академия  
им. П.А.Соловьёва, Рыбинск, Россия<sup>2</sup>ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Рыбинск, Россия

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ И МАЛОЖЁСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

На основе анализа остаточного напряжённого состояния детали и использования понятия начальных напряжений разработан энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения, обеспечивающий повышение сопротивления усталости и геометрической точности детали в пределах технологического допуска. В качестве критерия, характеризующего величину и характер остаточных деформаций использована энергия поверхностного пластически деформированного слоя. Это позволило заменить остаточные напряжения эквивалентными, постоянными по толщине слоя начальными напряжениями, что существенно упрощает прогнозирование деформаций. Показана реализация метода на примере упрочнения микрошариками.

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, остаточные и начальные напряжения, технологические остаточные деформации, энергия поверхностного слоя, режимы упрочнения, номограмма

### Введение

Для повышения надёжности и долговечности ответственных деталей ГТД применяют упрочнение поверхностным пластическим деформированием. При этом режимы упрочнения назначают без учёта геометрии и жёсткости детали, что часто приводит к нежелательным, а в ряде случаев к недопустимым изменениям размеров и формы – технологическим остаточным деформациям деталей. В данной работе изложены общие принципы и подходы к определению рациональных режимов упрочнения, которые наряду с повышением сопротивления усталости должны обеспечивать необходимую геометрическую точность деталей. В качестве примера показано применение метода для выбора режима упрочнения стальными микрошариками.

### 1. Общие принципы определения режимов упрочнения

В основе решения задачи назначения рациональных режимов упрочнения лежит создание в поверхностном слое детали такого распределения ОН, при котором деталь будет обладать необходимым или максимально-возможным пределом выносливости при условии, что технологические остаточные деформации (ТОД) не превысят технологические допуски. Решение данной задачи состоит из трех основных этапов.

**Первый этап** – определение в поверхностном слое упрочняемой детали остаточных (или соответствующих им начальных [1]) напряжений, которые обеспечивают наибольшее повышение предела выносливости.

**Второй этап** заключается в прогнозировании возможных ТОД деталей, обусловленных остаточными или начальными напряжениями (НН). Если возможные деформации детали превышают технологические допуски, то на основе расчетных методик подбирают такие величины НН и зоны упрочнения, которые обеспечивали бы необходимую геометрическую точность детали. Расчетные методики **основаны** на аналитическом [2] или численном КЭ-методе [3].

**На третьем этапе** – после определения на предыдущих этапах необходимых НН требуется найти параметры режимов упрочнения, обеспечивающих в поверхностном слое детали указанные напряжения.

Для реализации первого и третьего этапов предварительно проводят экспериментальные исследования связи параметров режима упрочнения  $\lambda_i$  с величиной и глубиной залегания НН и пределом выносливости, которые определяют на образцах или опытных деталях. Для широко используемого в настоящее время дробеструйного способа упрочнения микрошариками к таким основным параметрам относятся: давление воздуха  $p$ , диаметр шариков  $d_{ш}$ , время упрочнения  $\tau$ , концен-

трация микрошариков  $K_{ш}$ , скорость движения сопла  $V_c$ , расстояние от сопла до упрочняемой поверхности  $h$ , скорость вращения рабочего стола  $\omega_c$ . Обычно управляемым параметром является давление воздуха или рабочей жидкости  $p$ , т.к. остальные параметры регламентированы исходя из конструкции установок, либо являются взаимозависимыми и обусловлены размерами и геометрией упрочняемых деталей.

## 2. Обоснование энергетического метода определения режимов упрочнения

Для реализации всех трех этапов требуется критерий, характеризующий величину и характер деформаций. Из закона сохранения энергии следует, что энергия упругой деформации деталей  $U_d$  (т.е. энергия ТОД) связана с энергией  $U_a$  поверхностного слоя  $a$ , пластически деформированного в процессе упрочняющей обработки. Следовательно,

$$U_d = \Delta U_a = f(U_a) \quad (1)$$

Очевидно, что энергия  $U_a$  обусловлена необратимыми изменениями линейных размеров в материале (пластические деформации, структурно-фазовые превращения и др.), называемыми первоначальными деформациями (ПД). Однако, в силу отсутствия достаточно точных методов определения ПД, на практике для определения  $U_a$  удобнее пользоваться понятием условных начальных напряжений [1]. При этом, как показано в работе [2], применение НН для расчета ТОД не требует (в отличие от ОН) уменьшать размеры детали на величину слоя  $a$ . Такой подход становится особенно удобным и эффективным при расчёте ТОД методом КЭ с применением специализированных пакетов.

Принято считать, что дробеударные способы упрочнения создают в направлениях  $X$  и  $Y$  (рис. 1) одинаковое пластическое деформирование поверхностного слоя и, следовательно,  $\sigma_x = \sigma_y$ .

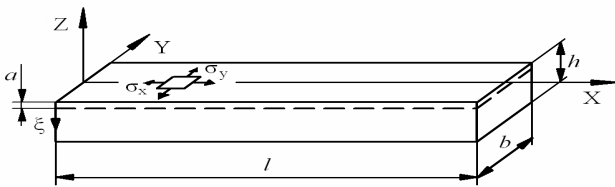


Рис. 1. Схема образца

Поскольку метод удаления поверхностных слоёв позволяет определять на образце только совокупность ОН  $\sigma_{ост} = (\sigma_x - \mu\sigma_y)$ , то можно принять

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\sigma_{ост}}{1 - \mu}, \quad \sigma_z = \sigma_{\xi} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала.

Соответствующие НН получим методом последовательных приближений путем последовательных

расчетов по формулам:

$$\sigma_{н,i}(\xi) = \sigma_{ост}(\xi) + f_{p,i-1}(\xi) \int_0^{a_{i-1}} \sigma_{н,i-1} d\xi, \quad i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

где при  $i = 1$ ,  $i-1 = 0$  следует принять

$$\begin{aligned} \sigma_{н,0}(\xi) &= \sigma_{ост}(\xi); \\ f_{\delta}(\xi) &= \frac{3(h - 2\xi)(h - 2\xi_{\bar{n}}) + h^2}{h^3}, \\ \xi_{\bar{n}} &\approx \int_0^a \sigma_{i \bar{n}0} \xi d\xi / \int_0^a \sigma_{i \bar{n}0} d\xi. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь за толщину слоя  $a$  принимают точку на оси  $\xi$ , когда в процессе травления прекращается изменение деформаций образца. Эта точка обычно близка к точке пересечения эпюры  $\sigma_{ост}$  с осью  $\xi$ . Величину  $a$  можно найти также измерением микротвердости на косых шлифах пластически деформированного слоя.

Расчеты показывают, что количество необходимых приближений существенно зависит от отношения  $\alpha = a/h$ . Если величина  $\alpha < 0,05$ , то с точностью до 3 – 5 % различием между ОН и НН можно пренебречь и для расчета ТОД можно использовать ОН.

В общем случае выражение для удельной энергии деформированного материала имеет вид

$$u_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (5)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные начальные напряжения.

Учитывая, что при ППД возникают сжимающие ОН и НН, то в рамках условия (2) можно принять  $\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_n / 1 - \mu$ ,

и на основании (5) получаем

$$u_0 = \frac{\sigma_n^2}{(1 - \mu) \cdot E}. \quad (6)$$

В тех случаях, когда ОН  $\sigma_x \neq \sigma_y$  и упрочняемая поверхность детали обладает существенной кривизной, то следует анализировать соответствующее начальное напряженное состояние в слое  $a$  и определять главные напряжения. При этом в большинстве практических случаев напряжениями  $\sigma_{\xi}$  можно пренебречь, т.к. их величина имеет порядок  $\sigma_{ост} \cdot a/R$ , где  $R$  – радиус кривизны поверхности.

Для обоснования выбора критерия введем понятие удельной энергии поверхностного слоя  $a$ :

$$U_0 = \int_0^a u_0 d\xi = \frac{1}{(1 - \mu)E} \int_0^a \sigma_1^2 d\xi. \quad (7)$$

Тогда параметры режимов упрочнения  $\lambda_i$  будем связывать с величиной и глубиной залегания НН через  $U_0$ , от которой зависят ТОД. В этом случае становится возможным пренебречь характером распределения НН по толщине слоя  $a$ . Это существ-

венно упрощает расчеты ТОД, т.к. фактическое распределение НН можно заменить некоторыми постоянными по толщине слоя  $a$  эквивалентными напряжениями  $\sigma_3 = \text{const}$ , величину которых найдем из соотношений

$$U_0 = \frac{1}{(1-\mu) \cdot E} \int_0^a \sigma_H^2 d\xi = \frac{1}{(1-\mu) \cdot E} \int_0^a \sigma_3^2 d\xi = \frac{\sigma_3^2 \cdot a}{(1-\mu) \cdot E}. \quad (8)$$

Отсюда получаем

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(1-\mu)E}{a}} U_0 = \sqrt{\frac{1}{a} \int_0^a \sigma_1^2 d\xi}. \quad (9)$$

Таким образом, величина  $U_0$  может служить универсальным критерием для перехода от режимов упрочнения к ТОД.

Особенно удобным становится применение  $U_0$  в задачах, где равномерная обработка упрочнением по всей поверхности детали вызывает недопустимые ТОД. В этом случае на эффективном режиме обрабатывают наиболее ответственные и опасные участки поверхности (например, наиболее нагруженные участки или зоны концентрации напряжений). В зависимости от возникающих при этом ТОД остальная поверхность, подлежащая упрочняющей обработке, обрабатывается на пониженном или повышенном (для исправления геометрии) относительно основного режимах. Решение принимают на основе предварительного расчетного анализа ТОД.

### 3. Определение параметров режимов упрочнения

#### 3.1. Методика определения режимов

Рассмотрим задачу определения необходимых параметров вышеуказанных режимов на основе расчётной величины  $U_{0p}$ . Для этого введем понятия допустимой деформации  $[\Delta_j]$  и “единичной” деформации  $\Delta_{1,j}$  – от “единичной” величины эквивалентных напряжений  $\sigma_{31}$ :

$$[\Delta_j] = \Delta_{j \ddot{r} \delta \delta \delta} - \Delta_{j \ddot{y} \delta \delta}; \quad \Delta_{1,j} = f_j(\sigma_{y1}), \quad (10)$$

где индекс  $j$  означает соответствующий вид деформации, например прогиб или разворот сечений лопатки, изменение диаметра валов или колец и т.п.;

$\Delta_{j \text{ пред}}$  – соответствующая предельная деформация, обусловленная технологическими допусками;

$\Delta_{j \text{ эфф}}$  – деформация, возникающая после упрочнения ответственных участков детали на эффективном режиме, обеспечивающем требуемый предел выносливости детали;

$f_j$  – функциональная зависимость деформации  $\Delta_{1,j}$  от напряжений  $\sigma_{31}$ .

Обозначим используемые при расчёте ТОД интегральные величины эквивалентных единичных и расчётных напряжений соответственно  $\Phi_{31}$  и  $\Phi_{3p}$ :

$$\Phi_{31} = \int_0^a \sigma_{31} d\xi = \sigma_{31} \cdot a, \quad \Phi_{3p} = \int_0^a \sigma_{3p} d\xi = \sigma_3 \cdot a. \quad (11)$$

Тогда на основании (9) можно записать

$$\Phi_{3p} = \Phi_{31} \cdot \frac{[\Delta_j]}{\Delta_{1,j}} \quad \text{или} \quad \sigma_{3p} = \sigma_{31} \cdot \frac{[\Delta_j]}{\Delta_{1,j}}. \quad (12)$$

В соответствии с законом Гука деформации деталей  $\Delta$  пропорциональны величине  $\sigma_3$ , а величина энергии  $U_0$  пропорциональна  $\Phi_3^2$ . Следовательно, искомую расчётную величину  $U_{0p}$  найдем из соотношения

$$U_{0p} = U_{0,1} \left( \frac{[\Delta_j]}{\Delta_{1,j}} \right)^2, \quad (13)$$

где 
$$U_{0,1} = \frac{1}{(1-\mu)E} \int_0^a \sigma_{31}^2 d\xi = \frac{\sigma_{31}^2 \cdot a}{(1-\mu)E}. \quad (14)$$

По найденной величине  $U_{0p}$  определяем соответствующую ей величину  $a$  и параметры режима упрочнения  $\lambda_i$  (в случае упрочнения микрошариками это будет давление  $p$ ). Необходимо отметить, что расчет деформаций  $\Delta_{1,j}$  начинают при толщине слоя  $a$ , соответствующей основному – эффективному режиму упрочнения. Если полученная величина  $a$ , соответствующая расчётной  $U_{0p}$  существенно отличается от исходной, то величину  $a$  уточняют и расчёт  $U_{0p}$  повторяют. Определение зависимостей  $U_0$  и  $a$  от параметра  $p$  осуществляют экспериментально.

Т.о., в соответствии с изложенными положениями, процесс назначения режимов упрочнения должен осуществляться в следующем порядке.

1. По предварительно найденной на первом этапе экспериментальной зависимости

$$\sigma_1 - U_0 - a - p,$$

представленной в виде номограммы (рис. 2), исходя из максимальной или заданной величины предела выносливости детали  $\sigma_{-1}$  назначают эффективный режим упрочнения и определяют соответствующие ему величины  $U_{0 \text{ эфф}}$ ,  $a$ , а также на основе соотношений (9) эквивалентную  $\sigma_{\text{эфф}}$ :

$$\sigma_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{(1-\mu)E}{a}} U_{0 \text{ эфф}}. \quad (15)$$

2. По величине  $\sigma_{\text{эфф}}$  вычисляют деформации  $\Delta_{j \text{ эфф}}$  при условии упрочнения детали по всей необходимой поверхности и сравнивают их с соответствующими технологическими допусками  $\Delta_{j \text{ пред}}$ . Если выполняется условие  $\Delta_{j \text{ эфф}} \leq \Delta_{j \text{ пред}}$ , то проводят упрочнение детали по всей расчётной поверхности.

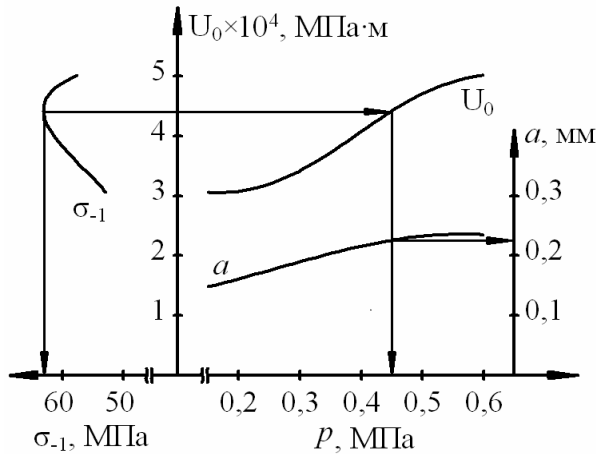


Рис. 2. Номограмма для определения режимов  $\sigma_{-1}$ ,  $U$ ,  $a$  – зависимости соответственно  $\sigma_{-1}$ ,  $U_0$  и  $a$  для стальных микрошариков

3. Если вышеуказанное условие не выполняется, то на основе анализа напряжённого состояния определяют зоны ответственных участков поверхности детали и в соответствии с (10) соответствующую допускаемую величину  $[\Delta_j]$ .

4. Для определения режима упрочняющей обработки оставшейся неотответственной поверхности задаются “единичной” величиной  $\sigma_{-1}$  и вычисляют соответствующие  $\Delta_{1,j}$ ,  $U_{0,1}$  и  $U_{0p}$ .

5. На основе номограммы (рис. 2) по величине  $U_{0p}$  уточняют толщину слоя  $a$ . Если полученная величина  $a$  незначительно (в пределах 3–5%) отличается от исходной, то по  $U_{0p}$  (рис. 2) находят соответствующую величину давления  $p$ . В противном случае уточняют величину  $a$  и расчёт повторяют в соответствии со схемой (16).

$$\begin{aligned} \sigma_{-1} &\rightarrow U_{0эфф} \rightarrow \{a, \sigma_{эфф}\} \rightarrow \{\Delta_{jэфф} \leftrightarrow \Delta_{jпред}\} \rightarrow \\ &\rightarrow [\Delta_j] \rightarrow \sigma_{-1} \rightarrow \{\Delta_{1,j}, U_{0,1}\} \rightarrow U_{0p} \rightarrow \{a, p\}. \end{aligned} \tag{16}$$

В ряде случаев возникает необходимость в устранении недопустимых деформаций, возникающих в процессе изготовления детали. В этом случае нужно подбирать не только режимы упрочнения, но и место расположения и размеры участков, которые следует обрабатывать. Эта задача решается аналогично по схеме (16), где в качестве  $[\Delta_j]$  принимают величину недопустимых деформаций.

### 3.2. Определение давления энергоносителя

Давление воздуха или жидкости является основным управляемым параметром режима упрочнения, который подбирают из условия формирования величины и глубины залегания ОН и обеспечения максимального или необходимого предела выносливости

детали. Предел выносливости определяют путем проведения усталостных испытаний стандартных образцов, изготовленных из материала детали по технологии, максимально приближенной к технологии изготовления детали.

В соответствии с изложенной выше методикой необходимо иметь зависимость предела выносливости  $\sigma_{-1}$  от удельной энергии поверхностного слоя  $U_0$  и, в свою очередь, зависимости  $U_0$  и толщины слоя  $a$  от давления  $p$ . Эти зависимости для каждого материала следует определять экспериментально, т.к. их аналитическое определение, в силу рассеяния характеристик свойств материала и параметров режима упрочнения, не обеспечивает необходимой достоверности. Полученные зависимости для удобства пользования могут быть представлены в виде номограммы. На рис. 2 приведена номограмма, построенная на основе результатов исследования предела выносливости и ОН на образцах из стали ЭП666, упрочнённых дробеструйным способом стальными микрошариками при давлениях 0,15–0,6 МПа. Схема пользования номограммой показана стрелками.

### 3.3. Определение взаимозависимых параметров

Для определения общего времени упрочнения  $\tau$  предварительно экспериментально находят длительность упрочнения единицы поверхности детали  $\tau_{опт}$  и диаметр участка (ядро) с эффективным упрочнением ( $d_я$ ). Величину  $\tau_{опт}$  определяют по кривым насыщения прогибов контрольных пластинок. Тогда общее время обдувки поверхности со средним диаметром  $D$  можно выразить следующим образом:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{d_я} \cdot \tau_{опт}. \tag{17}$$

При этом скорость вращения выбирается из условия:

$$\omega_c = \frac{2\pi \cdot n}{\tau} = \frac{2 \cdot n \cdot d_я}{D \cdot \tau_{опт}}, \tag{18}$$

где  $n$  – целое число оборотов детали.

### Заключение

На основе энергетического метода и понятия условных «начальных напряжений» разработана эффективная методика определения режимов упрочнения, обеспечивающая наряду с повышением сопротивления усталости геометрическую точность тонкостенных и маложёстких деталей ГТД. Данный метод может быть использован также для разработки способов устранения недопустимых ТОД, возникающих в процессе изготовления высокоточных деталей.

## Литература

1. Исаев А.И. Выбор оптимальной толщины об-разца при определении остаточных напряжений в поверхностном слое / А.И. Исаев, А.Н. Овсеенко // Вестник машиностроения. – 1967. – № 8. – С. 74-76.

2. Букатый С.А. Прогнозирование коробления деталей ГТД после обработки поверхности на основе

исследования остаточного напряжённого состоя-ния материала : дис. ... докт. техн. наук : 05.07.05, 01.02.06 / С.А. Букатый. – Р., 1996. – 265 с.

3. Букатый А.С. Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учетом гео-метрии упрочняемых деталей / А.С. Букатый // 7-я междунар. конф. «Авиация и космонавтика–2008»: Тезисы докл.– М.: МАИ-ПРИНТ, 2008.– С. 68.

Поступила в редакцию 23.04.2009

**Рецензент:** докт. техн. наук, проф., зам. главного инженера Л.Б.Уваров, ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия.

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЗМІЦНЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ТА МАЛОЖОРСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПОВЕРХНЕВОЮ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ

*С.А. Букатий, А.С. Букатий*

На основі аналізу залишкового напруженого стану деталі та використання поняття початкових напружень розроблений енергетичний метод визначення раціональних режимів зміцнення, що забезпечує підвищення опору втомлюваності та геометричній точності деталі в межах технологічного допуску. Як критерій, що характеризує величину та характер залишкових деформацій використана енергія поверхневого пластично деформованого шару. Це дозволило замінити залишкові напруження еквівалентними, постійними по товщині шару початковими напруженнями, що істотно спрощує прогнозування деформацій. Показана реалізація методу на прикладі зміцнення мікрокульками.

**Ключові слова:** поверхнєве зміцнення, залишкові та початкові напруження, технологічні залишкові деформації, енергія поверхневого шару, режими зміцнення, номограма.

## THE ENERGETIC METHOD FOR DETERMINATION OF THE EFFICIENT PARAMETERS OF STRENGTHENING THE THIN-WALLED AND THE SMALL-HARD PARTS OF GAS TURBINE ENGINES BY MEANS OF THE SURFACE PLASTIC DEFORMATION

*S.A. Bukaty, A.S. Bukaty*

The energetic method for determination of the efficient parameters of strengthening has been developed on the basis of the analysis of the residual stress of parts as well as on the initial stress conception. This method provides the increase of the endurance strength and the relationship of parts within the limits of technological tolerance. As a criterion for characterizing the magnitude and the nature of the residual strains, the energy of a plastically deformed surface has been used. It has allowed to replace the residual stress by its equivalents – i.e. the initial stresses constant through the surface- which makes the deformation forecasting much easier. The realization of the method is described on the example of shot peening strengthening.

**Key words:** surface strengthening, residual and initial stresses, technological residual deformations, the energy surface layer, parameters of strengthening, nomogram.

**Букатый Станислав Алексеевич** – докт. техн. наук., проф., профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева; директор ООО Научно-коммерческой фирмы «СБК», Рыбинск, Россия, E-mail: bukaty\_sa@mail.ru.

**Букатый Алексей Станиславович** – инженер ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия, E-mail: bukaty@inbox.ru.